

УДК 621.412-047.37

doi: 10.32620/aktt.2019.7.08

В. В. КОРОБКО

Національний університет кораблебудування ім. адм. С.О. Макарова, Миколаїв

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕРМОАКУСТИЧНОМУ ТУРБОГЕНЕРАТОРІ

Термоакустичні теплові машини (ТАТМ)- це відносно новий та мало поширений тип теплових машин, які суттєво відрізняються від традиційних механічних систем відсутністю рухомих елементів, екологічною безпечністю, здатністю працювати від зовнішніх джерел енергії. Термоакустичні двигуни (ТАД) – теплові машини прямої дії- здатні перетворювати теплову енергію в механічну в формі потужних акустичних хвиль. Зростаючий інтерес до ТАТМ пов'язаний з можливістю використання їх в системах енергозбереження, оскільки впровадження енергозощаджуючих технологій є дієвим методом підвищення ефективності енергетичних установок (ЕУ, та зменшення їх шкідливого впливу на довкілля. Широкому впровадженню ТАТМ заважає їх низька питома потужність, складність перетворення акустичних коливань в механічну роботу, брак досвіду.

В статті приведені результати експериментальних досліджень робочих характеристик дослідного термоакустичного турбогенератора (ТАТГ). До складу ТАТГ входив термоакустичний двигун, який працює за термодинамічним циклом Брайтона, та електрогенератор. В якості привода електрогенератора було використано імпульсну двонаправлену турбіну (ІДТ), яка здатна перетворювати коливний рух робочого середовища в механічну енергію. В ході експериментів були отримані дані що до зовнішніх, як, так і ТАТГ, при різних режимах навантаження. Взаємодія імпульсної двонаправленої турбіни з пульсуючим робочим середовищем призводить до появи в резонаторі складних радіальних течій, які впливають на ефективність процесів енергоперетворення.

В роботі, шляхом CFD моделювання, вивчалися особливості формування та розвитку радіальних течій. Граничні та початкові умови задавалися на основі експериментальних даних. Результати CFD експериментів дозволили вивчити вплив різних чинників на інтенсивність радіальних течій. Показано, що радіальні течії існують у вигляді квазістаціонарних пульсуючих структур, довжина яких залежить від амплітуди коливного руху пульсуючого середовища та частоти акустичних коливань. Наявність цих течій призводить для «удатного» входу потоку в спрямляючий апарат ІДТ. За результатами досліджень запропоновані технічні рішення, які запобігають їх утворенню.

Ключові слова: Імпульсна двонаправлена турбіна; термоакустика; CFD моделювання; теплові машини.

Вступ

Результати аналізу сучасного стану технологій енергозбереження та тенденцій їх розвитку свідчать про потребу в ефективних технологіях утилізації низькотемпературних джерел теплової енергії. На особливу увагу заслуговують енергогенеруючі технології, які здатні продукувати електричну енергію, оскільки це найбільш універсальний продукт.

Одним з можливих рішень є застосування термоакустичних технологій. Термоакустичні теплові двигуни здатні ефективно використовувати зовнішні низькотемпературні джерела теплової енергії, перетворювати теплову енергію в потужні акустичні коливання з подальшим виробництвом електричної енергії [1-3]. Відомі приклади використання в термоакустичних системах електрогенераторів на базі п'єзокерамічних елементів або лінійних генераторів [4]. Ці пристрої в своєму складі мають конструктивні елементи, які підтверджені знакозмінній механіч-

ній деформації, що зменшує їх надійність, крім того, такі перетворювачі мають високу вартість та малу питому потужність. Отже, створення нових та ефективних типів корисного навантаження для ТАТМ є актуальною задачею.

1. Аналіз досліджень і публікацій

Останнім часом велика увага приділяється акустико-механічним перетворювачам, в яких використовуються імпульсні турбіни двонаправленої дії (ІДТ). Ці турбіни здатні працювати в умовах коливного руху робочого середовища, зберігаючи напрям свого обертання [5-7].

ІДТ дають змогу створити термоакустичні турбогенератори з потужність на рівні $10^2...10^3$ кВт, або більше, що цілком достатньо для початку їх широкого впровадження на практиці. Однак робота ІДТ в умовах реальних ТАД має певні особливості, які потребують дослідження.

Як було показано раніше [8], наявність ІДТ в резонаторі ТАД призводить до появи складних гідродинамічних процесів, які можуть впливати як на характеристики ІДТ, так і на роботу ТАД.

Мета роботи – дослідження характеристик дослідного термоакустичного турбогенератора та особливостей гідродинамічних процесів в його резонаторі.

2. Постановка задачі

У відповідності до мети досліджень були сформульовані задачі:

- експериментальним шляхом отримати характеристики дослідного ТАТГ;
- методами CFD моделювання дослідити особливості розвитку гідродинамічних процесів в резонаторі ТАТГ.

3. Викладення основного матеріалу

3.1. Дослідний стенд та обладнання

Для вивчення характеристик ІДТ використовувався спеціальний стенд, оснащений мікропроцесорною контрольно-вимірною системою, рис. 1.

Основою експериментальної установки є дослідний ТАД, який працює в режимі стоячої хвилі, реалізуючи цикл Брайтону. Максимальна теплова потужність даного ТАД сягає 600 Вт. Акустична потужність ТАД визначалась модифікованим методом двох датчиків [1, 9], та шляхом прямих вимірювань коливної швидкості та акустичного тиску.

Для цього в резонаторі ТАД були встановлені чотири швидкодійні датчики тиску типу MP7005, та два зонди термоанемометра DISA 5500D.

Для проведення досліджень використовувався дослідний зразок ІДТ. Розрахунки геометрії елементів цієї ІДТ виконувались згідно з рекомендаціями, що наведені в роботах [5, 8, 9].

Конструктивні елементи – ротор турбіни, направляючі апарати та обтікачі – були виготовлені методом 3D друку з PLS пластика. Ротор ІДТ був жорстко пов'язаний з трьохфазним безколекторним електричним генератором.

Вихідна напруга з генератора подавалась на випрямляч, який було виготовлено з використанням діодів Шотки, в якості навантаження було приладнано лабораторний реостат типу Р 517-М.

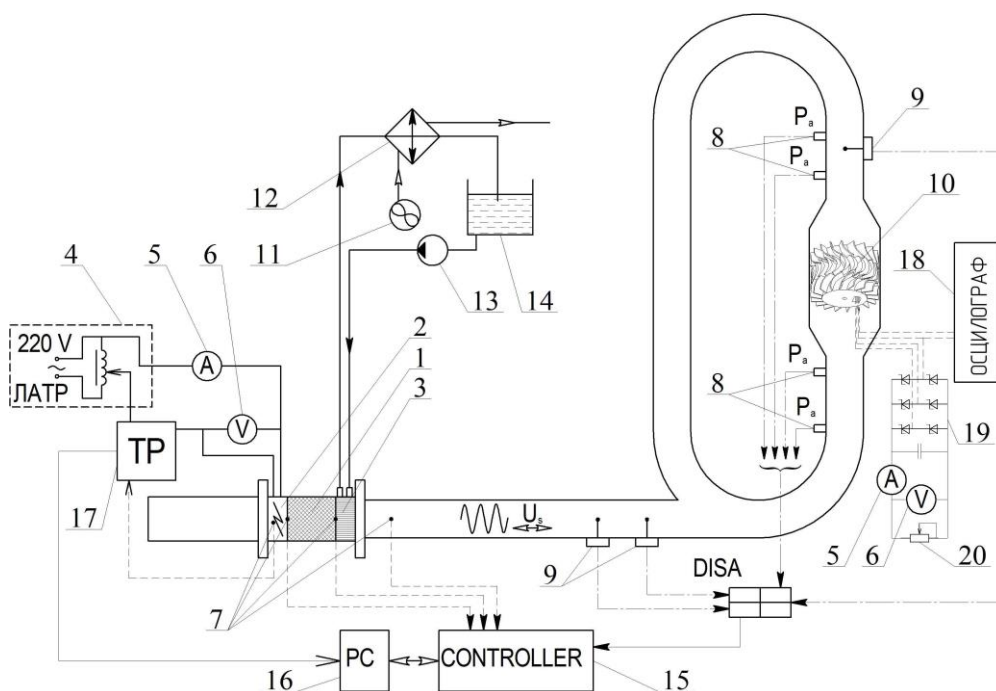


Рис. 1. Схема експериментального стенду для дослідження ІДТ:

- 1 – стек ТАД; 2 – нагрівач; 3 – охолоджувач; 4 – блок живлення; 5, 6 – амперметр і вольтметр;
 7 – термопари ХК; 8 – датчики тиску; 9 – зонди термоанемометра; 10 – імпульсна двонаправлена турбіна (ІДТ); 11 – вентилятор; 12 – охолоджувач; 13 – насос; 14 – бак; 15 – блок контролерів; 16 – ПК;
 17 – терморегулятор; 18 – осцилограф SDS 1074CFL; 19 – діодний міст; 20 – активне навантаження генератора ІДТ

Частота обертання турбіни визначалась з допомогою цифрового осцилографу SDS 1074CFL, який був підключений до однієї з обмоток генератора. Така схема дозволяла одночасно контролювати частоту обертання ротору ІДТ, електричну напругу та форму пульсацій струму.

Для вимірювання гідравлічного опору зразка ІДТ в односпрямованому потоці використовувалась відкрита аеродинамічна труба. Витрата повітря визначалась за допомогою лемніскати. Перепад статичного тиску в резонаторі на відрізок з ІДТ вимірювався похилими манометрами DISA та швидкодіючими п'єзокерамічними датчиками тиску, які були поєднані з контрольно-вимірювальною системою.

3.2. Результати експериментальних досліджень та CFD моделювання

В таблиці 1 наведені результати експериментальних досліджень характеристик дослідного ТАТГ. За рахунок регулювання електричної напруги на нагрівачі ТАД задавалась його потужність. Всі вимірювання проводились при постійному навантаженні генератора ІДТ, електричний опір якого становив 30 Ом.

Результати обробки експериментальних даних показані на рис. 2 та рис. 3 у вигляді залежностей к.к.д. ТАД та ТАТГ від режимних параметрів:

$$\eta_{\text{ТАД}} = E_{\text{ТАД}} / Q_{\text{in}} \quad \text{та} \quad \eta_{\text{ТАТГ}} = N_{\text{ТАТГ}} / Q_{\text{in}}.$$

Отримані результати показують, що дослідний ТАД забезпечує перетворення теплової енергії в акустичну з ефективністю на рівні 8...12 %, більші втрати мають місце при роботі ІДТ. Крім того, результати свідчать про наявність суттєвих втрат ефективності в дослідному ТАТГ саме на ланці ТАД - ТАТГ.

Особливості роботи наявного дослідного ТАТГ добре ілюструє рис. 4, на якому можна бачити, що існує максимум відносної потужності ТАТГ

$$\theta = N_{\text{ТАТГ}} / E_{\text{ТАД}},$$

який відповідає швидкості обертання ІДТ на рівні 3200...3500 об/хв.

Попередні дослідження показали що при роботі ІДТ в резонаторі в зонах безпосередньо прилеглих до турбіни виникають інтенсивні радіальні течії – квазістаціонарні періодичні структури, які здатні призвести до втрати ефективності ТАТГ.

Таблиця 1

Характеристики дослідного ТАТГ

Режим	Q_{in}	T	$E_{\text{ТАД}}$	$N_{\text{ТАТГ}}$	n	Карно	$\eta_{\text{ТАД}}$	$\eta_{\text{ТАТГ}}$
	Вт	К	Вт	Вт	об/мін	–	–	–
1	200	453	18,7	5,35	2500	0,35	0,094	0,027
2	300	502	33,2	12,20	3200	0,42	0,111	0,041
3	400	558	47,5	18,05	3900	0,47	0,119	0,045
4	500	618	63,0	21,20	4500	0,53	0,126	0,042

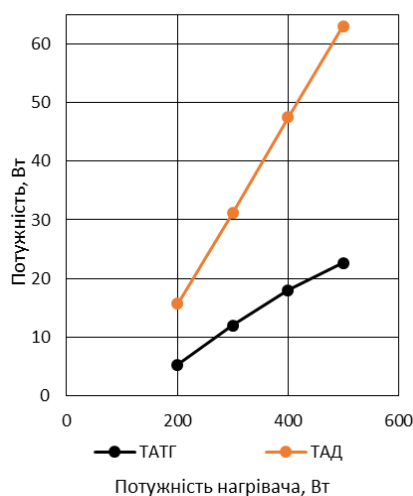


Рис. 2. Потужність ТАД та ТАТГ в залежності від потужності нагрівача

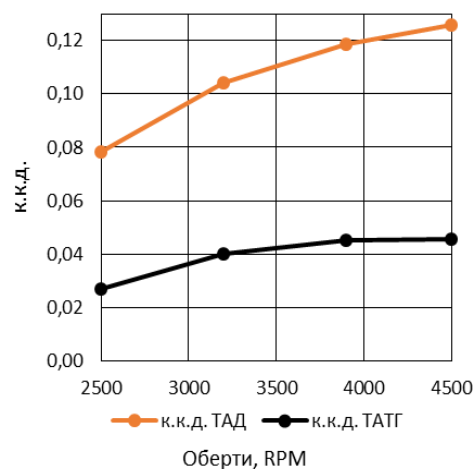


Рис. 3. Ефективність ТАТГ в залежності від обертів ІДТ

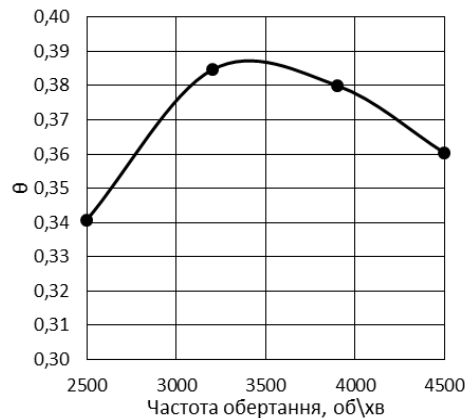


Рис. 4. Відносна потужність ТАТГ в залежності від обертів ІДТ

Безпосередні експериментальні дослідження структури потоків в резонаторі ТАТГ є край складною задачею, тому було вирішено використати методи CFD моделювання.

В ході CFD експериментів була досліджена 3D модель ділянки резонатора ТАД з ІДТ, вирішувалась нестационарна задача для стислого середовища, в розрахунках була використана стандартна k-ε модель турбулентності.

Граничні умови, які задавалися під час моделювання, були визначені експериментальним шляхом. Для кожного режиму роботи ІДТ задавалися коливальна швидкість середовища, частота акустичної хвилі та частота обертання ротору.

Таким чином, маємо можливість шляхом CFD експерименту досліджувати процеси взаємодії акустичних коливань з потоками, які генеруються під час роботи ІДТ.

Про складність гідродинамічної картини в резонаторі з ІДТ, свідчать данні, показані на рис. 5 та рис. 6, на яких показані якісні картини тангенціальних циркуляційних течій в резонаторі, в зонах безпосередньо прилеглих до ІДТ, в момент зміни напрямку коливного руху робочого середовища. Отже бачимо, що в резонаторі виникає складна гідродинамічна структура, яка визначає входні умови для соплового апарату ІДТ. Така ситуація суперечить гіпотезі про наявність плоского фронту акустичної хвилі, яка покладена в основу методики розрахунку проточної частини ІДТ [5, 9]. Рис. 6 показує, що вектори коливної швидкості на вході та виході з соплового апарату ІДТ розташовані під кутом до осі резонатора. В умовах осцилюючого руху середовища, наслідком таких течій є «ударний» вхід потоку до спрямляючого апарату, що призводить до втрат енергії і погіршення характеристик ІДТ.

Розрахунки показали, що максимальні значення швидкості тангенціальних течій сягають 0,5 ... 0,75 від амплітуди коливної швидкості, а довжина зон цих течій становить 5 ... 7 амплітуд коливного руху.

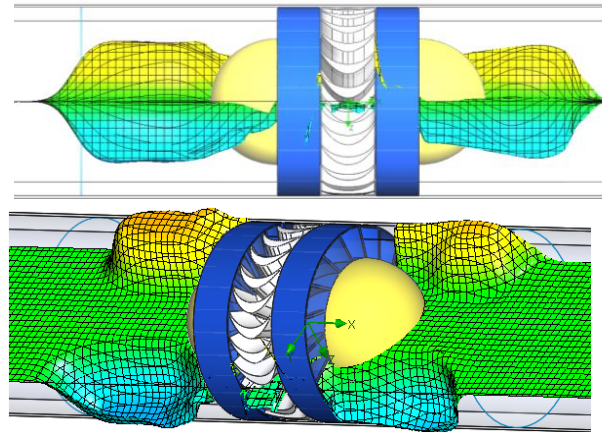


Рис. 5. Зони вторинних радіальних течій в резонаторі ТАТМ

$U_s = 10$ м/сек, $f = 60$ Hz, 2500 RPM

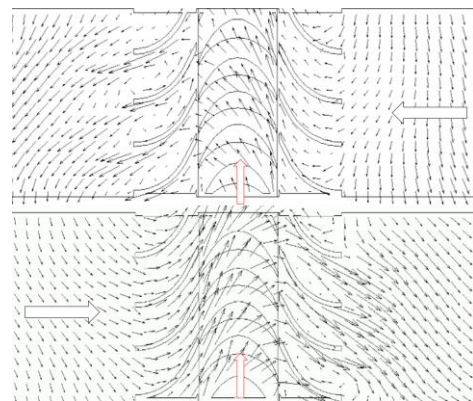


Рис. 6. Ударний вхід в соплову решітку та відрив потоку на виході з неї

Як показали результати CFD моделювання, зменшити вплив цих течій можна за рахунок низки конструктивних рішень. Так, збільшення довжини спрямляючого апарату ІДТ призводить до зменшення інтенсивності радіальних течій на 50 ... 70 %, в залежності від параметрів акустичної хвилі. Також на формування вторинних течій суттєво впливає конструкція обтікачів. Дієвим заходом може стати профілювання резонатора.

Висновки

1. В результаті проведених досліджень отримана інформація про зовнішні характеристики дослідного ТАТГ.
2. Використання експериментальних даних в ході CFD моделювання дозволило дослідити особливості гідродинамічної ситуації в резонаторі ТАТГ.
3. Показано, що класична лінійна модель акустичної хвилі не відображає всіх особливостей гідродинамічної ситуації в резонаторі ТАТМ з ІДТ.
4. Коливний рух робочого середовища вздовж лопатевого апарату ІДТ призводить до в резонаторі появи просторових квазістационарних циркуляційних течій по обох сторонах турбіни.

5. Пульсуючі циркуляційні течії визначають неоднорідність розподілу потоку на вході до спрямляючих апаратів ІДТ, що призводить до суттєвих втрат ефективності.

6. Числове моделювання показало, що вдосконалення конструкції спрямляючого апарата ІДТ та профілювання резонатора дає можливість знизити інтенсивність радіальних течій на 50...70 %, та підвищити ефективність ІДТ. Цей висновок потребує експериментального підтвердження.

Література

1. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators [Text]* / G. W. Swift. – American Inst. of Physics, 2002. – 300 p.
2. De Blok, K. *Low operating temperature integral thermoacoustic devices for solar cooling and waste heat recovery [Text]* / K. De Blok // *Acoustic-2008, International conference.* – Paris, 2008. – P. 18–24.
3. Keolian, Robert M. *Truck Thermoacoustic Generator and Chiller. Final Report. DOE Project DE-FC26-04NT42113 CPR/IW Project 17057 [Text]* / M. Robert Keolian // *Applied Research Laboratory. The Pennsylvania State University.* 2011. – 190 p. DOI: 10.2172/1026487.
4. De Blok, K. *Acoustic to electric power conversion [Електронний ресурс]* / K. De Blok, P. Owczarek, M. Francois. – Режим доступу: <http://www.aster-thermoacoustics.com/>. – 08.02.2019.
5. Thakker, A. *Modeling and scaling of the impulse turbine for wave power applications. [Text]* / A. Thakker, F. Hourigan // *Renewable Energy.* – 2004. – Vol. 29, no. 3. – P. 305–317. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00253-2.
6. De Blok, K. *Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity [Електронний ресурс]* / Kees de Blok. – Режим доступу: <http://www.aster-thermoacoustics.com/>. – 08.02.2019.
7. Коробко, В.В. *Дослідження особливостей використання імпульсних двонаправлених турбін в термоакустичних машинах [Текст]* / В. В. Коробко, О. О. Московко, І. В. Воронов // *Наук. вісник Херсонської державної морської академії.* – Херсон: Видавництво ХДМА, 2016. – № 1 (14). – С. 201-208.
8. Дослідження роботи імпульсної двонаправленої турбіни в резонаторі термоакустичного двигуна [Текст] / В. В. Коробко, О. О. Московко, Г.Б. Мостипаненко та інші // *Авиационно-*

космическая техника и технология. – 2017. – № 8 (143). – С. 19-25.

9. Klopogge, T., *Turbine design for thermoacoustic generator [Text] : masters thesis / T. Klopogge.* – *Aeronautical Engineering. Hogeschool IN-Holland Delft*, 2012. – 72 p.

References

1. Swift, G. W. *Thermoacoustic: A unifying perspective for some engines and refrigerators.* American Inst. of Physics, 2002. 300 p.
2. De Blok K., *Low operating temperature integral thermoacoustic devices for solar cooling and waste heat recovery.* Paris, *Acoustic-2008, Inter. Conf.* 2008. pp. 18–24.
3. Keolian, Robert M. *Truck Thermoacoustic Generator and Chiller. Final Report. DOE Project DE-FC26-04NT42113 CPR/IW Project 17057.* Applied Research Laboratory. The Pennsylvania State University. 2011. 190 p. DOI: 10.2172/1026487.
4. De Blok, K., Owczarek, P., Francois, M., *Acoustic to electric power conversion.* Available at: <http://www.aster-thermoacoustics.com/> (accessed 08.02.2019).
5. Thakker, A., Hourigan, F *Modeling and scaling of the impulse turbine for wave power applications.* *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, no. 3, pp. 305–317. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00253-2.
6. De Blok, K. *Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity.* Available at: <http://www.aster-thermoacoustics.com/> (accessed 08.02.2019).
7. Korobko, V. V., Moskovko, O. O., Voronov, I. V. *Doslidzhennya osoblyvostej vykorystannya impulsnyx dvonapravlenyx turbin v termoakustichnyx mashynax* [Investigation use of features of puls bidirectional turbyne in thermoacoustic heat machines]. *Naukovyy visnyk KhDMA – Scientific Bulletin of KhDMA*, 2016, no. 1 (14), pp. 201-208.
8. Korobko, V. V., Moskovko, O. O., Mostipanenko, H. B., Serbin, S. I., *Doslidzhennya roboty impulsnoyi dvonapravlenoyi turbiny v rezonatori termoakustichnogo dyvuna* [Investigation of the operation of the pulse bi-directional turbine in the resonator of the thermoacoustic engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2017, no. 8(143), pp. 19–25.
9. Klopogge, T. *Turbine design for thermoacoustic generator : Masters thesis.* Aeronautical Engineering, Hogeschool Holland Delft, 2012. 72 p.

Поступила в редакцию 01.07.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОАКУСТЕСКОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

В. В. Коробко

Термоакустическая тепловая машина (ТАТМ) – это относительно новый и мало распространенный тип тепловых машин, которые существенно отличаются от традиционных механических систем отсутствием подвижных элементов, экологической безопасностью, способностью работать от внешних источников энергии. Термоакустические двигатели (ТАД) – это тепловые машины прямого действия, которые способны превращать тепловую энергию в механическую в форме мощных акустических волн. Растущий интерес к ТАТМ связан с возможностью использования их в системах энергосбережения, поскольку внедрение энергосберегающих технологий является действенным методом повышения эффективности энергетических установок (ЭУ). Широкому внедрению ТАТМ мешает их низкая удельная мощность, сложность преобразования акустических пульсаций в механическую работу, недостаток опыта.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик опытного термоакустического турбогенератора (ТАТГ). В состав ТАТГ входил термоакустический двигатель, работающий по термодинамическому циклу Брайтона, ИДТ и электрогенератор. В качестве привода электрогенератора использована импульсная двунаправленная турбина (ИДТ), которая способна преобразовывать колебательное движение рабочей среды в механическую энергию. В ходе экспериментов были получены данные о внешних характеристиках ТАД и ТАТГ при различных режимах нагрузки. Показано, что взаимодействие импульсной двунаправленной турбины с пульсирующей рабочей средой приводит к появлению в резонаторе радиальных течений, влияющих на эффективность процессов энергопреобразования. В работе, путем CFD моделирования, изучались особенности формирования и развития радиальных течений. Граничные и начальные условия задавались на основе экспериментальных данных. Результаты CFD экспериментов позволили изучить влияние различных факторов на интенсивность радиальных течений. Показано, что радиальные течения существуют в виде квазистационарных пульсирующих структур, продольный размер которых зависит от амплитуды колебательного смещения пульсирующей среды и частоты акустических колебаний. Наличие этих течений приводит к «ударному» входу потока в спрямляющий аппарат ИДТ. По результатам исследований предложены технические решения, которые предотвращают их образование.

Ключевые слова: Импульсная двунаправленная турбина; термоакустика; CFD моделирование; тепловые машины.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF WORKING PROCESSES IN A THERMOACOUSTIC TURBINE GENERATOR

V. V. Korobko

Thermoacoustic thermal machines (TATM) is a relatively new and non-common type of thermal machines that differs significantly from conventional mechanical systems due to the lack of moving elements, environmental safety, and the ability to operate from external sources of energy. Thermoacoustic engines (TAE) - direct-acting thermal machines that are capable of converting thermal energy into mechanical in the form of powerful acoustic waves. The growing interest to TATM is related to the possibility of using them in energy saving systems since the introduction of energy saving technologies is an effective method for increasing the efficiency of power plants and reducing their harmful effects on the environment. The wide introduction of TATM is hampered by their low specific power, the complexity of the transformation of acoustic oscillations into mechanical work and lack of experience.

The article presents the results of experimental research on the operational characteristics of the thermoacoustic turbogenerator (TATG). The TATG consists of a thermoacoustic engine, which operates in the Brighton thermodynamic cycle and an electric generator. As an actuator of an electric generator, a pulsed bi-directional turbine was used. It is capable of converting the oscillatory motion of the working medium into mechanical energy. In the course of experiments, data were obtained on external characteristics of both TAE and TATG at different load conditions. The interaction of a pulsed bi-directional turbine with a pulsating working medium leads to the appearance of complex radial currents in the resonator that affects the efficiency of the energy conversion processes.

In the work, using CFD simulation, the peculiarities of formation and development of radial currents were studied. Boundary and initial conditions were imposed based on experimental data. The results of CFD experiments allowed us to study the influence of various factors on the intensity of radial currents. It is shown that radial currents exist in the form of quasistationary pulsating structures whose length depends on the amplitude of the oscillatory motion of the pulsating medium and the frequency of acoustic oscillations. The presence of these currents leads to the "desired" flow of input into the rectifying apparatus of the impulse turbine. According to the results of the research, technical solutions are proposed that prevent the formation of such currents.

Keywords: bidirectional impulse turbine; thermoacoustic; CFD modeling; heat machines.

Коробко Владимир Владиславович – канд. техн. наук, доцент, Национальный университет кораблестроения, доцент кафедры ССЭУ, Николаев, Украина.

Korobko Volodymyr Vladyslavovych – PhD, associate professor, National University of Shipbuilding, associate professor of the department MPP, Nikolaev, Ukraine; e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, kvv001@gmail.com; ORCID Author ID: 0000-0001-5761-6824, Scopus Author ID: 54420455300.